

شبیه‌سازی عددی رفتار آلودگی هوای تهران براساس الگوی باد

حسین علی قنبری - دانشجوی دکترای اقلیم‌شناسی، دانشگاه تهران

قاسم عزیزی* - دانشیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۸۶/۱۱/۱۵ تأیید نهایی: ۱۳۸۷/۸/۱

چکیده

در نوشتار حاضر رفتار آلودگی هوا در سطح شهر تهران با در نظر گرفتن الگوی باد با استفاده از یک مدل میان‌مقیاس موسوم به مدل آلودگی هوا^۱ (TAPM) شبیه‌سازی شده است. در این زمینه سه دامنه با تفکیک افقی ۳۰، ۱۵ و ۵ کیلومتر در نظر گرفته شده و خروجی‌های آن با درجه تفکیک ۵ کیلومتر لحاظ شده است. شبیه‌سازی براساس آلاینده‌های PM-10 و CO و داده‌های باد در تراز ده‌متری از پنج نقطه شهر با در نظر گرفتن دو حالت (با حضور شرایط سینوپتیک و بدون حضور شرایط سینوپتیک) انجام گرفته است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی حاکی از آن است که الگوی باد در شرایط در نظر گرفتن سینوپتیک همگن‌تر است و با افزایش ارتفاع، سرعت نیز افزایش می‌یابد. در مقابل، در وضعیت بدون حضور شرایط سینوپتیک الگوی باد ناهمگن است و با افزایش ارتفاع، سرعت نیز کاهش می‌یابد، همچنین غلظت عناصر آلاینده از شمال به جنوب و از شرق به غرب افزایش می‌یابد. حداکثر غلظت در مناطق شهری ۱۱ و ۱۲ و حداقل آن در مناطق ۴ و ۲۱ مشاهده شده است، که این مسئله با جهت باد در مدل و نیز از طریق رسم گلباد، همخوانی دارد. خروجی مدل نشان می‌دهد که از لحاظ جهت باد، شبیه‌سازی با شرایط واقعی همخوانی خوبی دارد. از لحاظ سرعت نیز شاخص توافقی^۲ ۶۰ درصد وجود دارد. مدل به کار گرفته شده، در خصوص آلودگی تا ۵۱ درصد شبیه‌سازی را به‌درستی انجام داده است، ضمن اینکه مدل برای یک سطح شبیه‌سازی انجام می‌دهد در صورتی که اندازه‌گیری‌های واقعی به‌صورت نقطه‌ای هستند. سرانجام آنالیز واریانس بین مناطق مختلف شهر، حاکی از آن است که میانگین آلودگی در مناطق ۱۱ و ۱۲ اختلاف معنی‌داری با سایر مناطق نشان می‌دهد. با توجه به اینکه سرعت باد جز در موارد بسیار محدود از ۲۰ گره (۱۰ متر بر ثانیه) کمتر بوده است، در نتیجه آلودگی در سیکل بسته‌ای در تهران گرفتار می‌آید و برای مدت طولانی از سطح شهر تخلیه نمی‌شود.

کلیدواژه‌ها: آلودگی هوا، الگوی باد، شبیه‌سازی عددی، مدل TAPM، تهران.

مقدمه

آلودگی هوا در زندگی انسان زمانی محسوس شد که سکونت انسان به صورت اجتماعات متمرکز و ثابت شکل گرفت. به تدریج با گذشت زمان و گسترش آبادانی‌ها و به‌ویژه با شروع انقلاب صنعتی، آلودگی هوا مخصوصاً در زمان حاضر به

* E-mail: ghazizi@ut.ac.ir

مسئله‌ای بین‌المللی بدل شده است. سازمان‌های جهانی و منطقه‌ای برای جلوگیری از گسترش آلودگی هوا، تدابیر مختلفی اندیشیده‌اند و در برخی موارد به نتایج خوب و استانداردهای مناسبی برای هوای شهرها دست یافته‌اند.

شهر تهران به عنوان بزرگ‌ترین شهر ایران با جمعیتی حدود ۷/۷ میلیون نفر (مرکز آمار ایران، ۱۳۸۵) یکی از کلان‌شهرهای دنیا به شمار می‌آید. عوامل طبیعی، فرم ساخت شهری، وجود بیش از ۲ میلیون خودروی فعال (شهرداری تهران، ۱۳۸۴) و ۵۰۰ هزار موتورسیکلت، ۵۰۰۰ واحد صنعتی (۲۵ درصد از کل صنایع کشور) با مصرف حدود ۲۰ درصد کل انرژی کشور، تمرکز ۷۰ درصد خدمات و ۸۰ درصد متخصصان، این شهر را به یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان تبدیل کرده است (سازمان محیط زیست، ۱۳۷۶)؛ تا بدان‌جا که در برهه‌ای از زمان به‌عنوان آلوده‌ترین شهر بعد از دهلی‌نو شناخته شد. مسئله پیچیده آلودگی هوای تهران که بر اثر عوامل ذکر شده در طی چند دهه اخیر به شکل حاضر درآمده است، نیازمند شناختی دقیق و مؤثر از منابع و عواملی است که موجب انتشار و توزیع آلاینده‌ها در سطح این شهر گردیده است.

به‌طور کلی آلودگی هوا در سطح شهری چون تهران دارای سه مرحله است:

۱. منابع آلودگی یا آلاینده‌ها که مواد مضر برای سلامتی انسان را وارد اتمسفر می‌کنند.
۲. انتشارات که از طریق جو و طی فرایند پخش و انتشار انجام می‌شود. در میان شرایط جوی عامل باد، جهت و سرعت آن بسیار تعیین‌کننده است.
۳. پتانسیل آلوده شدن که به محیط و موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی بستگی دارد. بسیاری از شهرهای جهان، هم از نظر میزان صنعتی شدن و وجود کارخانه‌ها و کارگاه‌ها و هم از نظر تعداد خودرو، در مرتبه‌ای بالاتر از تهران قرار دارند اما شرایط توپوگرافی و جغرافیایی‌شان مناسب‌تر است و به همین دلیل از پتانسیل آلوده شدن دور مانده‌اند.

آلودگی هوا و تأکید بر زیستن در محیطی سالم از ابتدای تاریخ مورد توجه دانشمندان و فلاسفه بوده است. بقراط مهم‌ترین و مؤثرترین اصل بهداشت عمومی را بهره‌مندی از هوای پاک دانسته است. ابوعلی سینا وجود گرد و غبار در هوا را یکی از دلایل کوتاهی عمر بشر به‌شمار آورده است. ادوارد اول در سال ۱۳۰۰ میلادی اعلامیه‌ای به این مضمون صادر کرد: تمام کسانی که صدای مرا می‌شنوند، آگاه باشند که هرکس به علت سوزاندن زغال‌سنگ مقصر شناخته شود، سر خود را از دست می‌دهد (محرّم‌نژاد، ۱۳۷۹). در قدیم، آلودگی شهرها به علت وجود و رها کردن همه نوع زباله در کوچه و معابر اتفاق می‌افتاده است؛ اما امروز آلودگی هوا - که به همان اندازه زیان‌آور و نامطبوع است - جایگزین آن شده است. از همان زمانی که اولین حادثه آلودگی هوا در دره میوز بلژیک (دسامبر ۱۹۳۰) به‌وقوع پیوست، توجه همه کارشناسان، معماران و شهرسازان به مسئله آلودگی هوا جلب شد و همگان تلاش بی‌وقفه‌ای را برای شناسایی علل و عوامل آلودگی هوا آغاز کردند. از جمله مطالعات و تحقیقات کاملی که درباره آلودگی هوای شهر صورت گرفته است می‌توان به مطالعه لندن، لس‌آنجلس، توکیو و مکزیکوسیتی اشاره کرد. بسیاری از شهرهای جهان با الگو قرار دادن کارهای انجام شده در این شهرها، تلاش کردند تا مسئله آلودگی هوا را در کشور خود حل کنند. برخی از انواع آلودگی به نام شهرهای فوق نامگذاری شده است، مثل آلودگی نوع لس‌آنجلس و یا نوع مکزیکوسیتی (بهرام سلطانی، ۱۳۷۹).

شاید اولین پژوهش در مورد آلودگی هوای تهران را رولف آلیسن در سال ۱۹۷۱ انجام داده باشد. وی عناصر آلاینده موجود در هوای تهران را مورد مطالعه و ارزیابی قرار داد و رابطه این عناصر را با برخی بیماری‌ها بیان کرد. شبیه‌سازی عددی آلودگی هوا از دهه ۷۰ میلادی با وارد شدن رایانه به عرصه زندگی بشر مورد توجه قرار گرفت. اما تا نیل به مقصود به دو دهه زمان نیاز بود. امروزه اکثر شبیه‌سازی‌ها در مورد آلودگی هوا حداکثر به دهه ۹۰ برمی‌گردند.

در مورد آلودگی هوا برزوسکی (۲۰۰۵) شبیه‌سازی عددی را براساس میزان انتشارات خارج شده از آگروز هواپیماها در منطقه‌ای نظامی در لهستان انجام داده است. هدف وی پیش‌بینی میزان مونواکسید کربن (CO) در منطقه‌ای نظامی به منظور حفظ سلامت کارکنان آن بوده است.

مدل‌سازی عددی آلدین (۲۰۰۵) به دنبال یافتن راهی برای برآورد رابطه بین متغیرهای آلودگی مانند ذرات معلق PM10 و NOx با حجم ترافیک و متغیرهای هواشناسی است. مدل وی بر مبنای داده‌های ساعتی و درازمدت قرار دارد و محدوده آن شهر اسلو در نروژ را دربرمی‌گیرد.

هاریسون و همکاران (۲۰۰۵) شبیه‌سازی عددی‌شان را بر مبنای مقایسه بین تمرکز آلاینده‌ها در سال ۲۰۰۰ و ۱۹۹۹ در زمستان و تابستان در وست‌میدلند انجام دادند. نتیجه این شبیه‌سازی آشکار ساخت که میزان آلاینده‌ها در زمستان در منطقه مذکور نصف دوره تابستانی آن است. کار آنها همچنین نشان داد که میزان آزن شهر نسبت به حومه ۱۵ درصد بالاتر است. آنها با در نظر گرفتن الگوی باد در محیط شهری - به‌ویژه در زمان حضور بادهای غربی - دریافتند که در زمان وزش بادهای غربی، آلودگی به شدت کاهش می‌یابد.

ایل (۲۰۰۱) مدل‌سازی آلودگی را در مقیاس ناحیه‌ای انجام داده و بیشتر تلاش وی ارزیابی ابزارهای سنجش آلاینده‌ها از گذشته تا حال و به‌دست آوردن میزان کارایی آنها و آشکار ساختن نقاط ضعف‌شان بوده است. وی با ارائه مدلی در خصوص آلودگی هوا، تلاش می‌کند تا رویکردی نو را در این زمینه مطرح سازد.

ایونسکو (۲۰۰۶) به مطالعه انتشارات آلاینده‌ها در تأسیسات صنعتی بزرگ پرداخته و مدلی را برای کنترل این فرایند ارائه کرده است. وی مدل خود را به صورت موردی برای صنعت فولاد تنظیم کرده است. نتیجه مدل وی حاکی از آن بوده که CO2 ارتباط خطی محکمی با اندازه لوله‌های خروجی کوره دارد، در صورتی که ارتباط NO2 از نوع غیرخطی است.

هان (۲۰۰۶) ضمن معرفی مدلی برای میزان انتشار آزن در مناطق شرق آسیا، تلاش دارد تا فرایندهای به وقوع پیوسته در تروپوسفر را نیز در زمان انتشار شبیه‌سازی کند. وی از داده‌های میانگین ماهانه بهره‌جسته و نتیجه حاکی است که مدل می‌تواند ارزیابی مناسبی از فرایندهای شیمیایی به دست دهد.

آشک (۲۰۰۶) به مدل‌سازی آلودگی هوا با استفاده از انتشار PM10 در لانستون استرالیا در دوره زمستان می‌پردازد. هدف وی مشخص ساختن ظرفیت شهر در پذیرش آلاینده با سوخت‌های جنگلی، با استفاده از مدل TAPM بوده است. نتیجه این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که زمانی که ۲۰ درصد از ساکنان شهر به استفاده از سوخت‌های جنگلی بپردازند، آلودگی PM10 در شهر خودنمایی می‌کند. همین نویسنده در مقاله دیگری به ارزیابی مدل TAPM پرداخته و ضمن

مقایسه دو منطقه شهری و روستایی با یکدیگر از نظر آلودگی و سنجش آن با داده‌های واقعی، کارایی آن را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد.

اما در خصوص ایران و به‌ویژه شهر تهران، مردزاده (۱۳۷۸) شبیه‌سازی عددی خود را درباره ارزیابی جزیره گرمایی تهران انجام داده و به این نتیجه رسیده است که جزیره گرمایی تهران در زمستان‌ها بسیار شدیدتر است.

علیچانی (۱۳۸۳) رابطه توزیع فشار با آلودگی هوای تهران را مورد بررسی قرار داده و رابطه بین تغییرات فشار را از یک تا سه روز قبل و بعد از یک سامانه و همین‌طور شدت هریک از آلاینده‌ها را در زمان حاکمیت سامانه محاسبه و مدل‌سازی کرده است. براساس مدل وی، مونواکسید کربن با تغییرات فشار همبستگی بهتری را نشان می‌دهد.

رنجر و بیدختی (۲۰۰۳) شبیه‌سازی عددی‌ای از جزیره گرمایی در تهران انجام داده‌اند که نشان می‌دهد جزیره گرمایی در شب به‌علت الگوهای باد حاکم در شهر ضعیف است. آنها شبیه‌سازی خود را برای دو روز مختلف یکی تحت شرایط حاکمیت توده هوای قاره‌ای قطبی و دیگری براساس حاکمیت توده هوای گرم حاره‌ای انجام دادند. در زمان حضور توده و هوای سرد قطبی، جزیره گرمایی در نیمه شمالی تهران تشکیل می‌شود و شدت بالایی دارد، در صورتی که در زمان حاکمیت توده هوای حاره‌ای، جزیره حرارتی شدت کمی دارد.

عرب حسینی و همکاران (۱۳۸۳) به‌وسیله یک مدل عددی به بررسی اثر ناهمواری سطح در شارهای لایه مرزی پرداخته که در آن از تقریب بوسینیک استفاده شده است. برای وارد کردن اثر ناهمواری سطح در مدل از MPDATA تبدیل مختصات گال - چن استفاده شد. منطقه موردنظر در این مطالعه در اطراف اصفهان و دارای ابعاد 2×10^4 است. نتیجه این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بادهای ایجاد شده در این منطقه شدیداً تحت تأثیر عوامل محلی قرار دارند.

با توجه به موارد یاد شده، در خصوص شهر تهران و اهمیت آن در سلسله‌مراتب شهری کشور و همین‌طور معضل آلودگی هوا در آن، چند عامل مهم باعث شد تا ضرورت اجرای پژوهش حاضر و هدف از انجام آن شکل گیرد. با توجه به موقعیت شهر تهران و اهمیت شاخص باد در آلودگی، ضروری است تا پراکندگی باد در سطح شهر و نحوه انتشار آن مورد ارزیابی و بررسی دقیق قرار گیرد و جهت‌های باد در سطح این شهر مدل‌سازی شود. عامل دوم، شناسایی نقاط بحرانی آلودگی در سطح شهر به‌منظور انجام اقدامات لازم در تأمین سلامت شهروندان است. مسئولان شهری با در اختیار داشتن الگوی باد و نحوه چرخش آن در شهر می‌توانند به پیش‌بینی نقاط بحرانی در آینده بپردازند.

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی و شبیه‌سازی پدیده‌های غالب در اتمسفر زمین به دو شیوه دینامیکی و آماری صورت می‌گیرد. مدل‌های دینامیکی را معمولاً بر مبنای قوانین فیزیکی برقرار می‌سازند. شناخت دقیق این قوانین با دشواری‌های خاص خود همراه است، چرا که این قوانین همواره با سه فاز جامد و مایع و بخار آب و تبدلات انرژی بین این سه فاز مرتبط‌اند. از طرفی دیگر به‌کارگیری این قوانین در زمان واقعی نیز با مشکلاتی همراه است. دسته دیگر، مدل‌های آماری است که عمدتاً فیزیک پدیده را به‌طور آشکار مورد توجه قرار نمی‌دهند و تنها بر تعیین ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها تأکید دارند. این دسته از مدل‌ها به‌دلیل سهولت استفاده، بر مدل‌های قبلی برتری دارند. با توجه به اینکه دیدگاه کلی حاکم بر جوامع علمی بر این است که نتایج مدل‌های دینامیکی بر مدل‌های آماری برتری دارند، لذا پژوهش حاضر نیز با شیوه دینامیکی به موضوع مورد مطالعه پرداخته است.

مدل TAPM

در پژوهش پیش رو از مدل آلودگی هوا^۱ (TAPM) استفاده شده است. این مدل را دانشمندان سازمان پژوهش صنعتی و علمی مشترک‌المنافع^۲ (CSIRO) در استرالیا شرح و بسط داده‌اند. TAPM مدلی بسیار ساده (منابع محاسباتی کمی نیاز دارد) و سریع (حدوداً ۱۰ دقیقه‌ای) است (زواررضا و همکاران، ۲۰۰۷). برد این مدل به صورت منطقه‌ای و در حد متوسط مقیاس^۳ است. همان‌طور که از نام آن پیداست، بیشتر برای شبه‌سازی عددی و مدل‌سازی برای آلودگی هوا به کار برده می‌شود. محدوده مورد مطالعه در این مدل، همان محدوده سینوپتیکی به ابعاد هزار کیلومتر و ارتفاع هشت کیلومتر از جو است. پژوهشگر، برحسب نوع تحقیق ابعاد منطقه مورد مطالعه را تعیین می‌کند. مثلاً بزرگ‌ترین منطقه آن ۳۰ کیلومتر - که به شبکه مادر موسوم است - و کوچک‌ترین آن می‌تواند به صورت ۵ کیلومتر در ۵ کیلومتر در نظر گرفته شود. کوچک‌ترین منطقه می‌تواند دوباره شبکه‌بندی شود. در این مدل، مناطق بیست‌ودوگانه تهران به صورت شبکه‌های مساوی با تفکیک‌پذیری پانصد متر در پانصد متر تقسیم شده‌اند.

مدل آلودگی هوا (TAPM) می‌تواند برای پیش‌بینی کردن تراکم آلودگی برای دوره‌های بالا تا یک سال استفاده شود (هورلی، ۲۰۰۵). TAPM یک مدل سه‌بعدی غیرقابل تلخیص، غیرایستا، و از نوع مدل معادلات ساده است که از سیستم مختصات داده‌های زمینی استفاده می‌کند (زواررضا و همکاران، ۲۰۰۷). آزمایش‌های بارز این مدل، تحت ویندوز بودن آن است. در مقایسه با مدل‌های مشابه از قبیل پژوهش و پیش‌بینی آب‌وهوا^۴ (WRF) که ینیکس است و با برنامه لینوکس اجرا می‌شود، سهولت‌کاری بیشتری دارد. تزریق داده‌ها و اطلاعات به آن بسیار ساده و راحت است. قدرت مانور این برنامه نیز بسیار بالاست، به طوری که می‌توان برخی عوارض را در آن حذف کرد؛ مثلاً برای بررسی باد می‌توان شهر، کوه، پوشش گیاهی یا منبع آب را حذف و تأثیر هر یک را جداگانه مطالعه کرد.

داده‌های مورد نیاز در این مدل به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱. داده‌های سطح زمین^۵ مثل توپوگرافی، پوشش گیاهی، آب و خاک. این داده‌ها با قدرت تفکیک^۶ یک کیلومتر در یک کیلومتر به وسیله شرکت ارائه‌دهنده مدل تهیه شده است و سالانه تجدید می‌شود. این داده‌ها برای همه نقاط جهان - از جمله تمام نقاط ایران - تهیه می‌شود؛ اما کاربر می‌تواند داده‌ها را تغییر دهد و اطلاعات مورد نظر خود را به مدل بدهد.

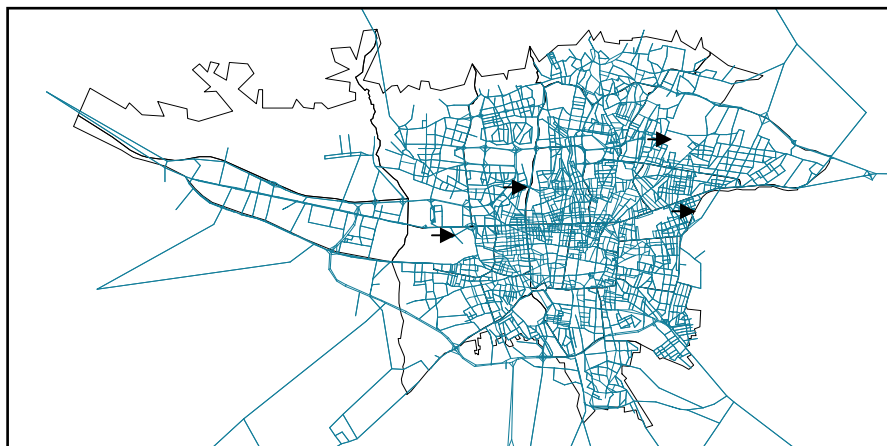
۲. داده‌های سینوپتیکی و هواشناسی مدل، که داده‌ای است تجزیه و تحلیلی که به وسیله هیئت استرالیایی هواشناسی تهیه و هر ساله تجدید می‌شود. قدرت تفکیک سینوپتیکی مدل ۷۵ کیلومتر است، که حداقل پوشش مدل است.

1. The Air Pollution Model
2. Common Wealth Scientific Industrial Research Organization
3. Mesoscale
4. Weather Research and Forecasting
5. Terrain
6. Resolution

۳. داده‌های نوع سوم بسته به نوع تحقیق دارد. مثلاً اگر پژوهش بر روی آلودگی هوا متمرکز شود، از داده‌های آلاینده استفاده می‌شود. در واقع نوع سوم از داده‌ها برعهده پژوهشگر است، به طوری که می‌تواند داده‌های شرکتی مدل را تغییر دهد و داده‌های خودش را در آن جایگزین کند. داده‌هایی که به مدل داده می‌شوند باید از نوع ASCII باشند، هر چند که مدل قابلیت تبدیل فرمت‌های مختلف داده‌ها را دارد.

داده‌ها می‌توانند به چهار صورت به این برنامه تغذیه شوند. الف) به صورت نقطه‌ای^۱، که در آن منبع آلاینده و منطقه مورد مطالعه به صورت نقطه‌ای با مختصات خاص در نظر گرفته می‌شود؛ مثل یک کارخانه. ب) خطی^۲ که جاده‌ها و خیابان‌ها در این دسته قرار می‌گیرند. انتشارات استخراج شده از جاده‌ها به برنامه داده می‌شود و برنامه آن را به صورت مساوی در طول خط پخش می‌کند و مدل را شبیه‌سازی می‌کند. ج) ناحیه‌ای^۳. ناحیه‌ای با ابعاد خاص به برنامه داده می‌شود و مدل از روی آن ساخته می‌شود. د) شبکه‌ای^۴ که ترکیبی از همه موارد ذکر شده در بالاست.

با توجه به اینکه مدل فقط داده‌های انتشارات^۵ را قبول می‌کند، نخستین قدم گردآوری این نوع از داده‌هاست. انتشارات از نوع آلاینده‌های مونواکسید کربن و ذرات معلق، به صورت ساعتی و روزانه از دو سازمان محیط زیست و شرکت کنترل کیفیت هوای تهران انتخاب شدند. دوره زمانی برای انتشارات از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ در نظر گرفته شد و ایستگاه‌های تأمین‌کننده آن فاطمی (عرض ۳۵°/۴۵' و طول ۵۱°/۰۸')، اقدسیه (عرض ۳۵°/۴۷' و طول ۵۱°/۳۷')، بازار (عرض ۳۵°/۳۲' و طول ۵۱°/۱۱') و آزادی (عرض ۳۵°/۴۱' و طول ۵۱°/۰۵') و سرخه‌حصار (عرض ۳۵°/۴۲' و طول ۵۱°/۲۰') بودند. در مرحله دوم، داده‌های باد به صورت ساعتی از همان ایستگاه‌هایی که داده‌های انتشارات از آنها در دسترس بود استخراج شدند. در شکل ۱ شهر تهران به همراه شبکه ارتباطی موقعیت ایستگاه‌های مذکور نشان داده شده است.



شکل ۱. شبکه ارتباطی شهر تهران و موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلودگی

1. Point Source
2. Line Source
3. Area Source
4. Grid Source
5. Emissions

گلباد سالانه ایستگاه‌های فوق به کمک نرم‌افزار WRPLOT ترسیم شد. سپس در مرحله سوم، شبه‌سازی به کمک مدل با داده‌های آلودگی انجام پذیرفت. در مرحله تجزیه و تحلیل، ضمن مقایسه الگوی باد مدل با الگوی باد واقعی، نقاط بحرانی شناسایی گردید و ارتباط آنها با الگوی باد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

در پژوهش حاضر، به یکی از عواملی که در ایجاد شرایط ذکر شده در شهر تهران دخالت دارند، یعنی عامل باد پرداخته می‌شود. باد یکی از مهم‌ترین کمیت‌هایی است که در کاهش یا تشدید غلظت آلاینده‌های هوا نقش اساسی ایفا می‌کند. سرعت کم باد می‌تواند باعث تشدید آلودگی و در نتیجه به خطر افتادن زندگی مردمان شود. اگر سرعت باد در سطح شهرها، از سرعت باد آستانه (Uc) بیشتر شود، آلودگی را از سطح شهر می‌زداید و باعث پاک‌سازی هوای آن می‌شود. سرعت باد آستانه از رابطه $Uc=3.41\log p-11.6$ به دست می‌آید (لندزبرگ، ۱۹۸۱).

در رابطه با P نشان‌دهنده میزان جمعیت شهر است. اگر جمعیت شهر تهران را حدود ۸ میلیون نفر در نظر بگیریم، آنگاه براساس رابطه مذکور، بادهایی با سرعت بیش از ۵ متر بر ثانیه در کاستن آلودگی هوای شهر مؤثر خواهند بود. با توجه به اینکه چنین سرعتی در تهران بسیار کم اتفاق می‌افتد، آلودگی در تهران شرایط ایستایی پیدا می‌کند. جدول ۱ درصد هوای آرام را در شهر تهران در ماه‌های مختلف سال در یک دوره آماری نسبتاً طولانی نشان می‌دهد.

جدول ۱. درصد هوای آرام در تهران، دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۶

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
مهرآباد	۶۴	۵۰	۴۳	۳۶	۳۲	۳۱	۳۵	۴۳	۴۸	۵۳	۶۳	۶۸	۴۷/۱۶
اقدسیه	۶۸	۶۴	۵۱	۴۱	۴۰	۴۴	۵۳	۵۲	۵۲	۵۴	۵۶	۶۷	۳۵/۵
بازار	۸۷	۸۲	۷۳	۶۸	۶۷	۷۰	۷۸	۷۶	۷۴	۷۶	۸۱	۸۵	۷۶/۴۱

منبع: داده‌های برگرفته از ایستگاه‌ها

سه ایستگاه فوق که سه منطقه جغرافیایی متفاوت را پوشش می‌دهند، از پیچیده بودن شرایط حاکم بر شهر تهران در برخورد با آلودگی هوا حکایت دارد. ساخت شهر تأثیر بسزایی در کاهش سرعت دارد. پژوهش حاضر در واقع گردش آلودگی هوا را در پیوند با الگوی باد، مورد ارزیابی و شبه‌سازی قرار می‌دهد.

جدول ۲. میزان انتشار آلاینده‌ها در هوای تهران، دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴

نوع آلاینده	NOx	PM10	Co	SO ₂
انتشار بر حسب هزار تن	۴۶۳۶۱	۷۷۸۱/۶	۶۷۳۶۳۶/۸	۶۰۵۷

منبع: برآورد نگارنده از داده‌های ایستگاه‌ها

یافته‌های تحقیق

به‌منظور انجام شبه‌سازی از شهر تهران با استفاده از این مدل و برای دستیابی به اهداف تحقیق و رسیدن به نتیجه مورد قبول، پنج نقطه (شمال غرب NW، شمال شرق NE، جنوب غرب SW، جنوب شرق SE و مرکز شهر CE) در شهر تهران به گونه‌ای انتخاب شدند که تقریباً تمام شهر تهران را پوشش دهند. سپس روزهای دوم و سوم ژانویه و ژوئیه (که نماینده فصل زمستان و تابستان در پژوهش‌اند) برای شبه‌سازی برگزیده شدند.

ابتدا الگوی باد حاکم بر شهر تهران مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد که باد در سطح شهر تهران دارای چرخه ثابتی نیست (شکل ۲) و در ۲۴ ساعت شبانه‌روز رفتارهای متفاوتی از الگوی باد به چشم می‌خورد. بنابر یافته‌های به دست آمده از شکل ۱، جریان باد در شب دارای الگوی تقریباً یکسانی است. از ساعت ۱۸ تا ۱۰ صبح روز بعد، جریان غالب باد عمدتاً شمال شرقی و شرقی است. اما از ۱۰ صبح، الگوی باد دستخوش دگرگونی می‌شود و به تدریج جریان جنوب غربی در سطح شهر غالب می‌شود. تصاویری که در شکل ۱ بر مبنای ساعت طی ۲۴ ساعت مرتب شده‌اند، بیانگر این مطلب‌اند که در ساعت صفر یا نیمه‌شب، غلبه باد با جهت شمالی و شرقی است. ارتفاعات قرار گرفته در این جهت‌ها را می‌توان دلیل این رفتار باد برشمرد. در ادامه ساعات شب - که به دلیل مشابه بودن تصاویر در شبیه‌سازی، تصاویر ساعت ۳ و ۶ بامداد قرار داده شدند - تغییر چندانی را نشان نمی‌دهند. این روند تا ۹ صبح همچنان ادامه می‌یابد. اما پس از این ساعت، به‌ویژه در ۱۰ صبح، الگوی باد به تدریج جهت شمال می‌یابد و این روند در ساعت ۱۲ کامل می‌شود. از ساعت ۱۱ صبح تا ۱۶ عصر، جهت جنوب غربی غالب می‌شود و از این ساعت به تدریج جریان باد برخلاف گردش عقربه‌های ساعت، دوباره به جهت شبانه‌گاهی خود بازمی‌گردد. از ساعت ۱۸ جریان شمالی و شرقی در سطح شهر غالب می‌شود. شبیه‌سازی برای روزهای زمستان و تابستان سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۶ انجام شد و در هر دو فصل، الگوی باد رفتار مشابهی را نشان داد. در ادامه، این جریان باد با لحاظ شدن آلودگی هوا مورد پایش قرار خواهد گرفت و رابطه آن با انتشار آلودگی در سطح شهر به تفصیل بررسی می‌شود.

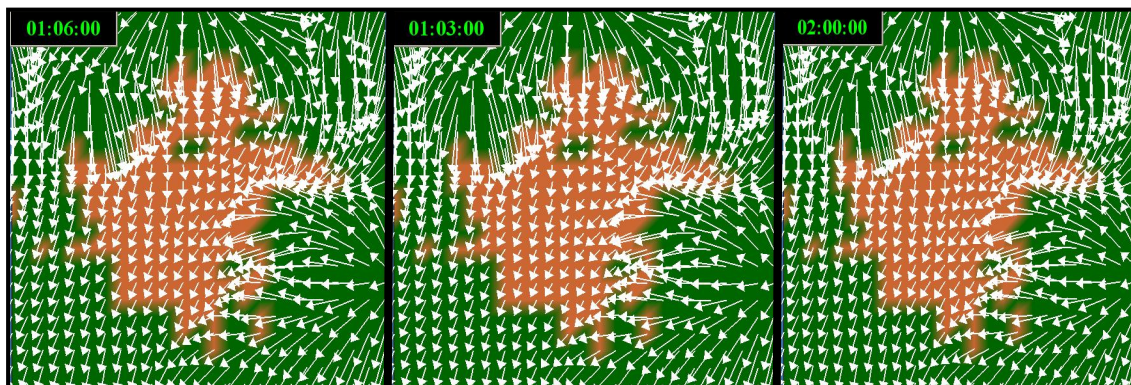
به منظور اطمینان یافتن از مدل در ارائه الگوی باد، با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های اقدسیه، فاطمی، بازار و مهرآباد، گلباد سال ۲۰۰۶ ترسیم شد (شکل ۲). در گلبادهای ترسیم شده که سمت و سرعت باد به صورت ساعتی در نظر گرفته شده است، ضمن تأیید مدل، چرخش باد در سطح شهر نشان داده می‌شود. براساس گلباد، ایستگاه مهرآباد به دلیل قرارگیری در مدخل ورودی شهر و دور بودن از کالبد فیزیکی شهر، هم از لحاظ سمت و هم از لحاظ سرعت باد تفاوت معنی‌داری با بقیه ایستگاه‌ها نشان می‌دهد.

بررسی الگوی باد با توجه به سطوح ارتفاعی و سرعت باد

تابستان

با توجه به اینکه هدف اصلی نوشتار حاضر، بررسی رفتار و انتشار آلودگی هوا براساس الگوی باد است، لذا ۵ نقطه از نقاط مختلف شهر که بتوانند گویای وضعیت تمام شهر باشند، انتخاب شده‌اند و در ادامه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. ابتدا به نقطه شمال غرب تهران پرداخته می‌شود، چرا که الگوی سرعت باد آن هم در تابستان و هم در زمستان متفاوت از چهار نقطه دیگر است. دلیل این امر وجود یک پرفشار محلی در این منطقه است، که تصاویر شبیه‌سازی شده در شکل ۱ به‌طور واضح آن را نشان می‌دهند. این الگوی سرعت باد که نمودار آن در شکل ۲ آورده شده، در حالتی بدون شرایط سینوپتیک شبیه‌سازی شده است. عوارض محلی تأثیر محسوسی بر روی الگوی سرعت آن دارد. این در حالی است که تأثیرات واقعی شرایط سینوپتیکی (شکل ۳) موجب تغییر این سرعت و تبدیل آن به سرعت‌های یکسان در

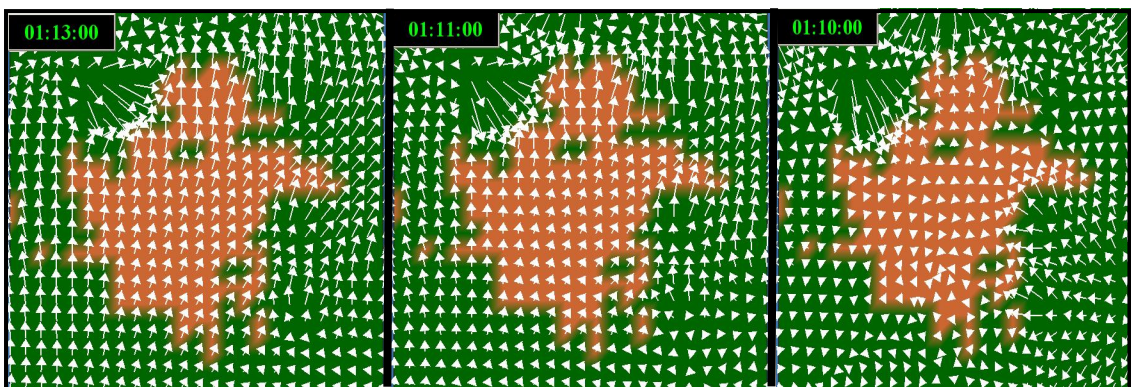
نمودارهای شکل ۲ شده است. بررسی نقشه‌های سینوپتیکی سازمان هواشناسی حاکی از آن است که حتی در پایین‌ترین سطح نیز این الگو قابل مشاهده نیست و محلی بودن آن را مورد تأیید قرار می‌دهد.



الف) الگوی باد ساعت صفر

ب) الگوی باد ساعت ۳ بامداد

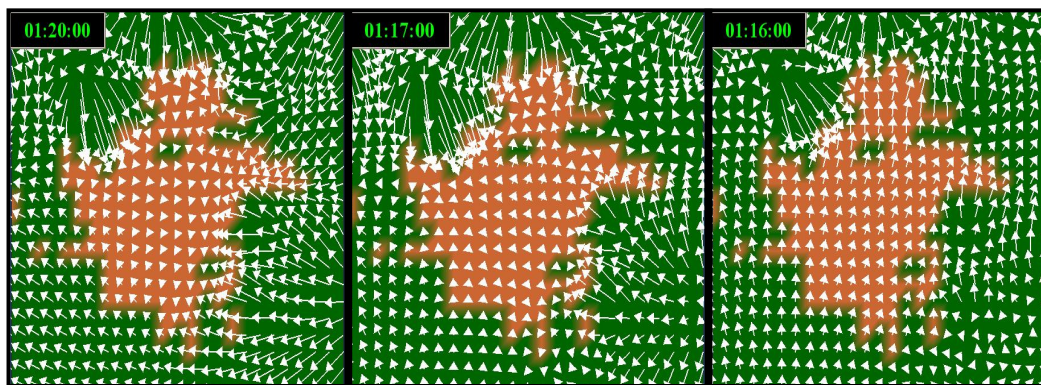
ج) الگوی باد ساعت ۶ بامداد



د) الگوی باد ساعت ۱۰ صبح

هـ) الگوی باد ساعت ۱۱ صبح

و) الگوی باد ساعت ۱ بعدازظهر

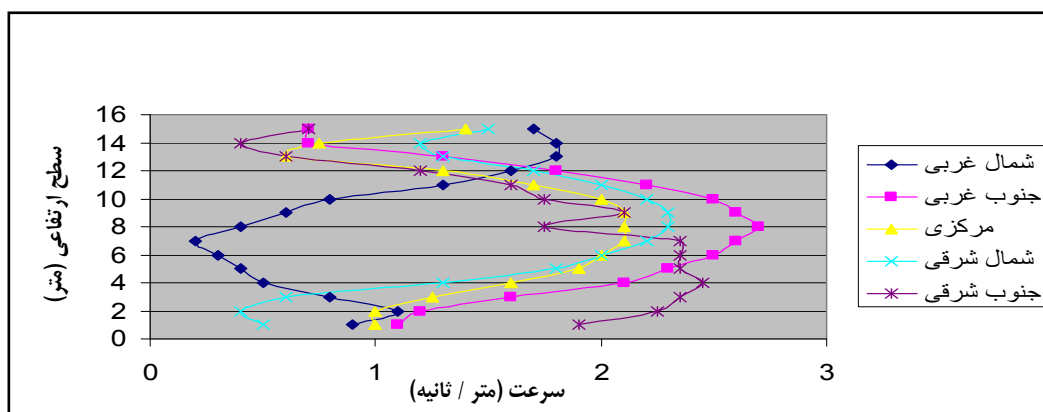


ز) الگوی باد ساعت ۴ عصر

ح) الگوی باد ساعت ۵ عصر

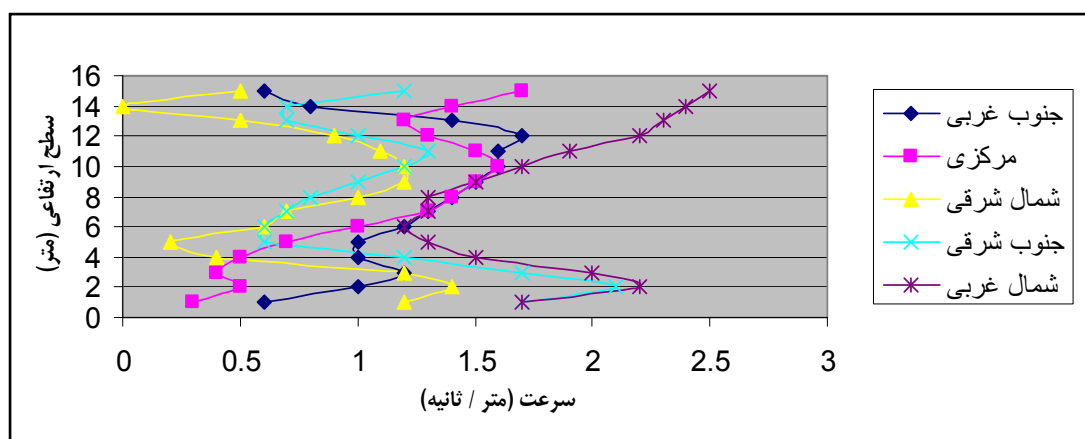
ط) الگوی باد ساعت ۸ شب

شکل ۲. ردیابی الگوی باد در تراز ۱۰ متری در یک ۲۴ ساعت از شبانه روز (۱ ژانویه ۲۰۰۶)، شبیه‌سازی شده به وسیله مدل TAPM



شکل ۳. نمودار الگوی سرعت باد در سطوح ارتفاعی مختلف در تابستان بدون شرایط سینوپتیک

در شکل ۳ محور افقی، سرعت باد برحسب متربرثانیه و محور عمودی ۱۵ سطح ارتفاع از سطح زمین را تا ارتفاع ۸۰۰۰ متری نشان می‌دهد. در سطح ارتفاعی ۱ سرعت باد در جنوب شرق دارای بیشترین سرعت نزدیک به ۲ متربرثانیه و شمال شرق دارای حداقل سرعت نیم‌متر بر ثانیه است. در سطح ارتفاعی چهار تا ۱۲ (شکل ۳) نمودار سرعت تغییرات زیادی را در مقایسه با بقیه نقاط نشان می‌دهد. این نقطه در شمال غرب تهران واقع شده است. تفاوت سرعت در منطقه شمال غرب تهران نشان از تفاوت الگوی این منطقه دارد، که همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، بازگوکننده وجود سازوکاری پرفشار در این منطقه است و در هنگام نبود شرایط سینوپتیکی خودنمایی می‌کند.

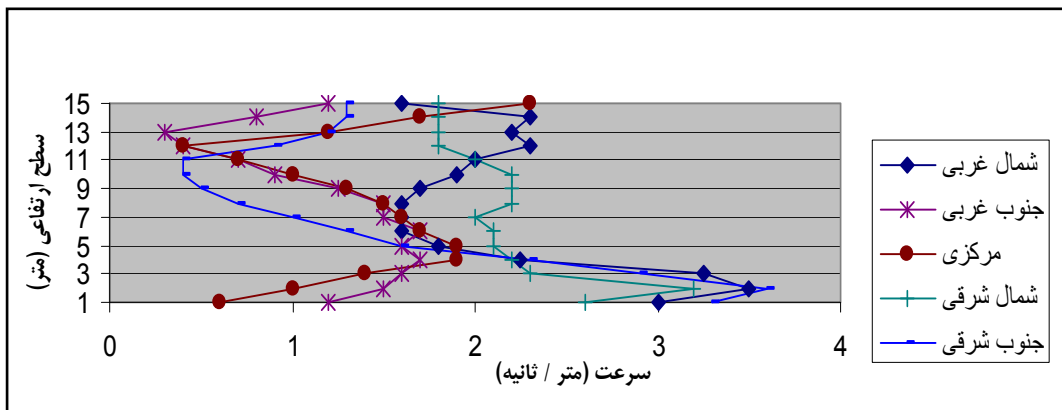


شکل ۴. نمودار الگوی سرعت باد در سطوح ارتفاعی مختلف در تابستان با شرایط سینوپتیک

بر اساس شکل ۳، مهم‌ترین تأثیر سامانه سینوپتیک در تابستان، همانا همگن شدن خطوط کنورهاست. نقاط انتخاب شده رفتار مشابهی از الگوی باد را به نمایش گذاشته‌اند. اما تفاوت بارزی که با در نظر گرفتن شرایط سینوپتیک در مدل ایجاد می‌شود، کاهش سرعت باد با افزایش ارتفاع در حالت بدون سینوپتیک و برعکس در شرایط سینوپتیک است.

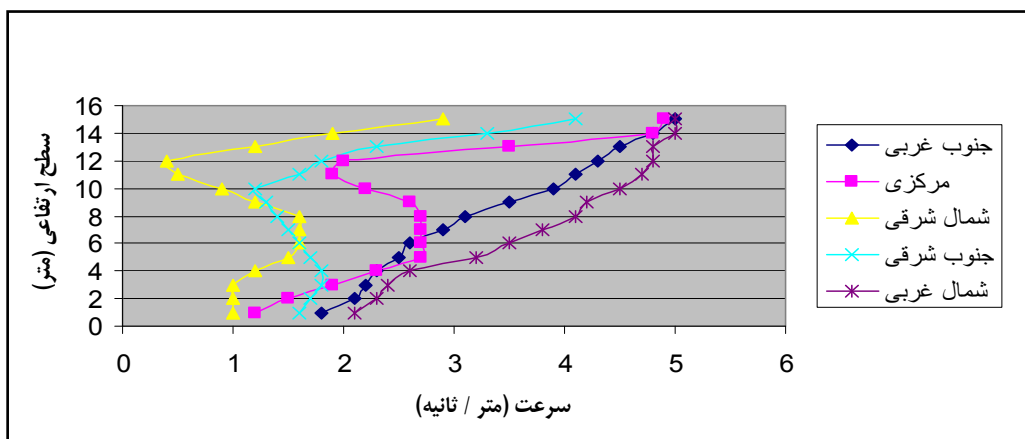
زمستان

در زمستان، سرعت باد در نقاط مدل‌سازی شده بدون در نظر گرفتن شرایط سینوپتیک (شکل ۵) دارای الگوی سرعتی همانند شکل ۵ است.



شکل ۵. الگوی سرعت باد در سطوح ارتفاعی مختلف در زمستان بدون شرایط سینوپتیک

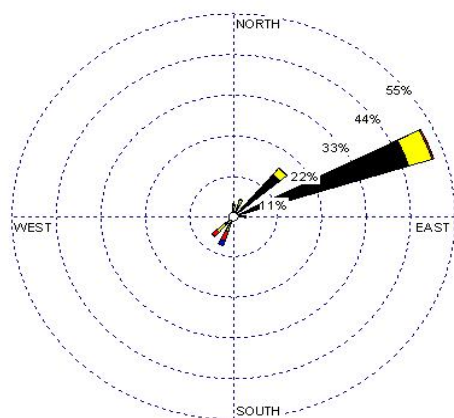
در شکل ۵ الگوی سرعت نقاط جنوب شرق، شمال شرق و شمال غرب در سطوح اول تا ۵ ارتفاعی مشابه یکدیگرند و با میزان سرعت در نقاط جنوب غرب و مرکز شهر تهران تفاوت دارند. به دلیل عدم دخالت سینوپتیک - همان‌طور که در مورد تابستان نیز صدق می‌کند - افزایش ارتفاع باعث کاهش سرعت باد شده و محدوده عمل باد را در سطح زمین نگه داشته است.



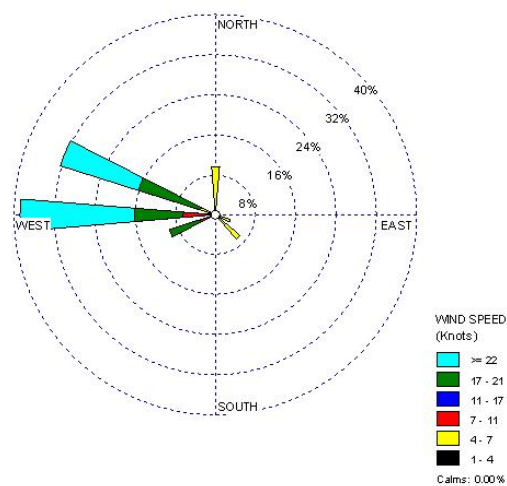
شکل ۶. الگوی سرعت باد در سطوح ارتفاعی مختلف در زمستان با شرایط سینوپتیک

تأثیر سامانه سینوپتیک بر روی الگوی باد در شهر تهران - بر مبنای شکل ۶ - به خوبی نشان می‌دهد که سرعت باد دارای تابعی صعودی است و در مقایسه با تابستان افزایش آشکاری دارد. بررسی گلبادهای ترسیم شده بر مبنای داده‌های ایستگاه‌های مختلف (شکل ۷) نیز این موضوع را تأیید می‌کند که بیشترین فراوانی در وقوع بادهای شدید در محدوده زمانی دسامبر تا اوایل ژوئن است. این محدوده در واقع همان محدوده تأثیرگذاری سامانه‌های غربی در دوره سرد

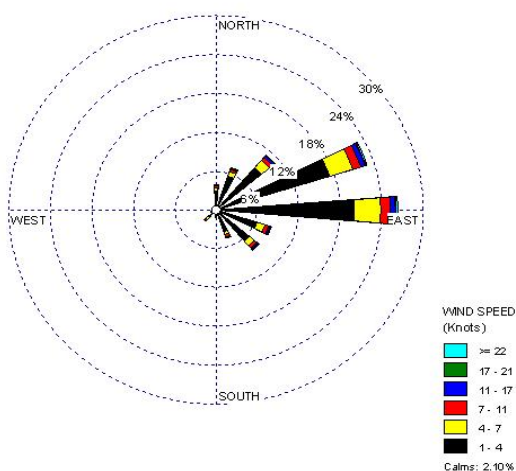
سال و همرفت دامنه‌ای در بهار است. از میان گلبادهای ترسیم شده، ایستگاه مهرآباد از لحاظ سرعت و سمت با بقیه ایستگاه‌ها تفاوت معنی‌داری را نشان می‌دهد. این مسئله به‌وسیله نمودارهای به‌دست آمده از مدل نیز پیش‌تر نشان داده شد. هر چه جریان به داخل شهر بیشتر نفوذ می‌کند، از سرعت آن کاسته می‌شود، به‌طوری‌که در ایستگاه‌های فاطمی و بازار در سال ۲۰۰۶ هیچ‌گونه بادی بالاتر از آستانه مشاهده نشده در صورتی که در ایستگاه مهرآباد تقریباً در تمام دوره سرد سال تا بهار بادهای بالاتر از آستانه به وقوع پیوسته و فقط در تابستان میزان آن به صفر رسیده است. نگاهی دیگر به گلبادها مؤید این مطلب خواهد بود که به همان میزان، روزهای آرامش هوا نیز در قسمت‌های ساخته‌شده شهر افزایش می‌یابد.



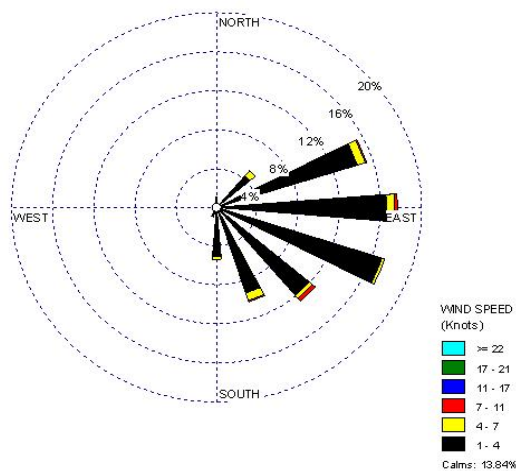
ب) گلباد سالانه ایستگاه فاطمی



الف) گلباد سالانه ایستگاه مهرآباد

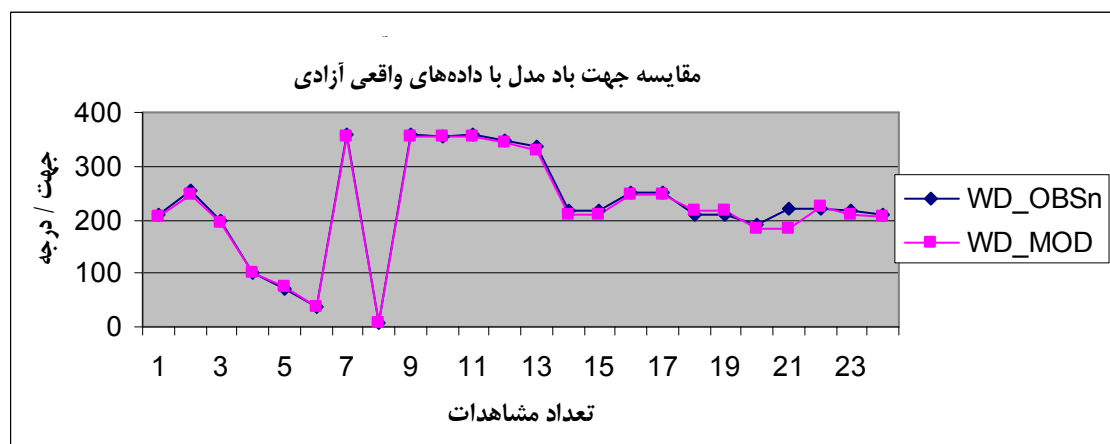
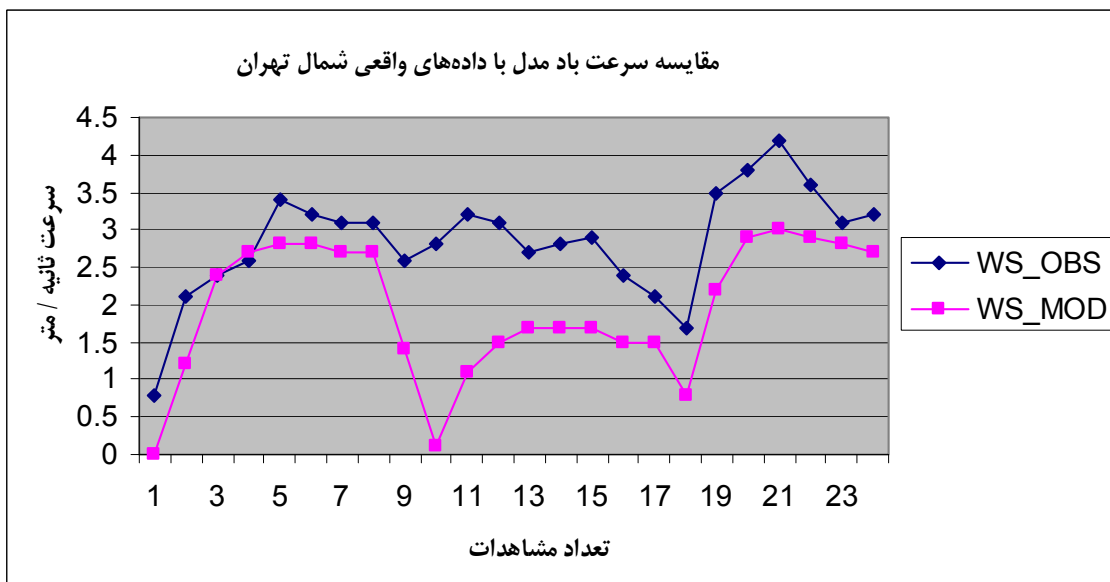
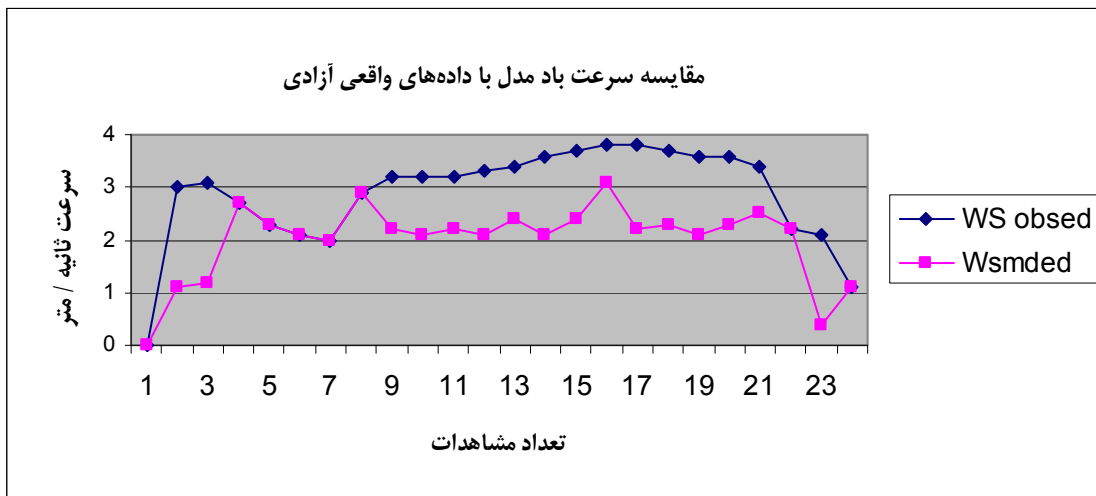


د) گلباد سالانه ایستگاه بازار



ج) گلباد سالانه ایستگاه اقدسیه

شکل ۷. گلباد سالانه ایستگاه‌ها در نقاط مختلف شهر تهران



شکل ۸. نمودارهای مقایسه‌ای جهت و سرعت باد شبیه‌سازی شده با داده‌های واقعی

پایش آلودگی هوا براساس الگوی باد

به منظور یافتن پاسخی بر این فرضیه که انتشار آلودگی هوا در سطح شهر از الگوی باد تبعیت می‌کند و جهت باد میزان انتشار را تعیین می‌کند، پس از بررسی الگوی باد در شهر، داده‌های آلاینده‌های PM10 و CO از ایستگاه‌های مختلف در شهر - به گونه‌ای که بتوانند پاسخگوی الگوی باد به دست آمده از طریق شبیه‌سازی باشند - استخراج شدند. این داده‌ها به صورت ساعتی و از ایستگاه‌های سرخه‌حصار در شرق تهران، بازار در جنوب، آزادی در غرب، فاطمی در مرکز و اقدسیه در شمال تهران انتخاب شدند (جدول ۳).

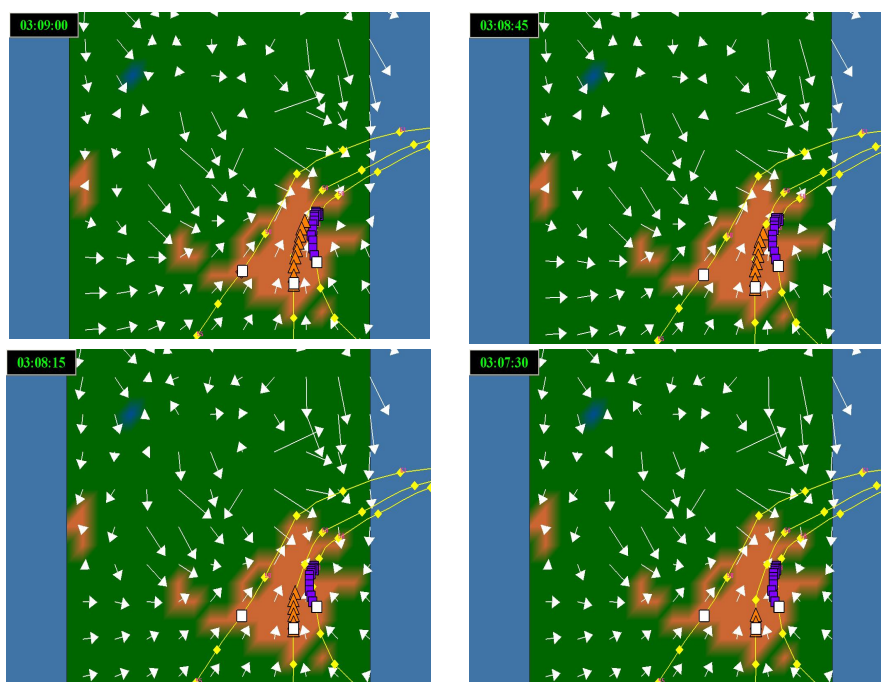
جدول ۳. ردیابی آلودگی هوا در ۲۴ ساعت شبانه‌روز، اول ژانویه ۲۰۰۶

ایستگاه سرخه حصار			ایستگاه اقدسیه			ایستگاه آزادی			ایستگاه فاطمی			ایستگاه بازار		
ساعت	COppm	PM10ug/M3	ساعت	CO	PM10	ساعت	CO	PM10	ساعت	CO	PM10	ساعت	CO	PM10
۱	۱/۵	۱۰	۱	۳/۲	۳۵/۸	۱	۵/۶	۳۲	۱	۵/۸	۵۹	۱	۱۱/۳	۶۴
۲	۱/۳	۸	۲	۳/۳	۳۲/۵	۲	۷/۴	۳۲	۲	۶/۴	۶۰	۲	۱۲/۲	۶۵
۳	۲	۷	۳	۳/۱	۲۷	۳	۹/۲	۲۳۸	۳	۶/۷	۶۸	۳	۱۲/۵	۱۴۸
۴	۰/۵	۶	۴	۳	۲۴/۳	۴	۸/۳	۳۰۶	۴	۸/۷	۶۸	۴	۱۱	۱۸۵
۵	۰/۷	۵	۵	۳/۶	۲۰/۶	۵	۸/۵	۲۲۳	۵	۹/۱	۶۴	۵	۱۳/۳	۱۸۸
۶	۰/۹	۵	۶	۴/۱	۲۳/۴	۶	۱۱/۲	۱۹۲	۶	۱۰/۲	۶۳	۶	۱۳/۲	۲۱۰
۷	۱/۲	۴	۷	۴/۲	۲۶/۵	۷	۱۳/۲	۱۴۵	۷	۱۲/۱	۶۱	۷	۱۳/۶	۱۶۵
۸	۱/۵	۴	۸	۴/۶	۲۷	۸	۱۳۵	۱۲۷	۸	۱۱/۴	۸۱	۸	۱۳	۱۱۱
۹	۱/۷	۴	۹	۵/۲	۳۴/۳	۹	۱۴/۴	۱۰۹	۹	۱۱/۳	۱۱۹	۹	۱۴/۴	۹۵
۱۰	۲	۸	۱۰	۶/۱	۴۸/۵	۱۰	۱۱/۲	۱۰۲	۱۰	۷/۴	۱۱۳	۱۰	۱۵/۱	۹۸
۱۱	۲/۳	۱۲	۱۱	۵/۲	۴۶/۸	۱۱	۱۴/۶	۹۳	۱۱	۸/۲	۱۰۳	۱۱	۱۵/۴	۸۷
۱۲	۲/۵	۱۳	۱۲	۵/۷	۴۳/۳	۱۲	۱۰/۸	۸۹	۱۲	۶/۴	۹۴	۱۲	۱۳/۴	۸۵
۱۳	۱/۵	۱۴	۱۳	۴/۵	۳۵/۴	۱۳	۹/۷	۷۰	۱۳	۵/۴	۸۳	۱۳	۱۲	۸۵
۱۴	۴/۵	۱۴	۱۴	۳/۳	۲۶/۸	۱۴	۱۱/۴	۶۳	۱۴	۶/۷	۷۶	۱۴	۱۱/۷	۸۵
۱۵	۵/۵	۱۳	۱۵	۳/۱	۲۰/۳	۱۵	۱۱/۶	۶۳	۱۵	۷/۵	۷۰	۱۵	۱۱	۶۹
۱۶	۶۰	۱۲	۱۶	۳/۲	۱۷/۵	۱۶	۱۲/۸	۶۳	۱۶	۸/۰	۵۹	۱۶	۱۲/۶	۶۵
۱۷	۷/۵	۱۳	۱۷	۴/۲	۱۵/۵	۱۷	۸/۴	۵۷	۱۷	۱۱/۴	۵۲	۱۷	۱۱/۴	۶۳
۱۸	۵/۵	۱۳	۱۸	۴/۱	۱۴/۵	۱۸	۳/۲	۴۸	۱۸	۱۱/۴	۴۸	۱۸	۱۳	۵۸
۱۹	۱/۵	۱۴	۱۹	۴/۶	۱۶/۸	۱۹	۴/۱	۴۸	۱۹	۱۱/۶	۴۵	۱۹	۱۱/۳	۵۶
۲۰	۲	۱۳	۲۰	۳/۲	۲۰	۲۰	۶/۲	۴۲	۲۰	۱۰/۷	۴۴	۲۰	۱۲/۲	۵۵
۲۱	۱/۲	۱۳	۲۱	۳/۳	۱۷/۸	۲۱	۴/۹	۴۲	۲۱	۹/۸	۴۰	۲۱	۸/۷	۴۴
۲۲	۱/۳	۱۲	۲۲	۲/۶	۱۶	۲۲	۸/۶	۴۱	۲۲	۴/۶	۳۷	۲۲	۹/۴	۴۴
۲۳	۱/۴	۱۱	۲۳	۲/۸	۲۳	۲۳	۶/۴	۴۲	۲۳	۵/۶	۴۰	۲۳	۵/۲	۲۸
۲۴	۱	۱۱	۲۴	۲/۵	۲۶/۵	۲۴	۵/۲	۴۱	۲۴	۵/۶	۳۲	۲۴	۶/۴	۴۱

داده‌های آلودگی به این خاطر یک‌روزه انتخاب شدند تا با روز شبهه‌سازی مطابقت داده شوند، آنگاه داده‌های آلودگی برای تمام سال ۲۰۰۶ مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. به دلیل فقدان ایستگاه سنجش آلودگی در جنوب شرق و شمال غرب، به این بخش از شهر داده‌ای در جدول اختصاص نیافته است. همان‌طور که در تجزیه و تحلیل باد مطرح شد، قسمت اعظم شبانه‌روز الگوی باد شمالی و شرقی است و تنها چند ساعت در روز (از ساعت ۱۰ تا ۱۶) الگوی جنوب غربی و غربی غلبه پیدا می‌کند. داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهند که آلودگی در ایستگاه سرخه‌حصار در کمترین میزان است و اختلاف معنی‌داری با سایر ایستگاه‌ها دارد. پس از ایستگاه سرخه‌حصار، ایستگاه اقدسیه نیز میزان کمتری از انتشارات آلودگی را دارد و به تدریج ایستگاه‌های بازار، آزادی و فاطمی رشد بالایی از آلودگی را به نمایش می‌گذارند. آنالیز واریانس ماهانه آلاینده‌های فوق در ایستگاه‌های موجود در شهر تهران، این مسئله را تأیید می‌کند که ایستگاه سرخه‌حصار دارای کمترین میزان انتشار آلودگی است و اختلاف معنی‌داری با بقیه ایستگاه‌ها دارد. غالب شدن جریان شرقی و شمال شرقی در محدوده ایستگاه، باعث شده است که سرخه‌حصار دارای میانگین ماهانه آلودگی کمتری باشد (جدول ۴). این در حالی است که ایستگاه بازار و آزادی و فاطمی از یک طرف به دلیل قرار گرفتن در چرخه باد در سطح شهر و از طرف دیگر به خاطر اثرگذاری بافت شهر بر سرعت باد، همواره آلودگی بیشتری دارند (شکل ۹).

جدول ۴. میانگین ماهانه آلاینده‌ها در ایستگاه‌های مختلف در ماه ژانویه

ایستگاه	اقدسیه	سرخه‌حصار	بازار	آزادی	فاطمی
Co ppm	۳/۱	۲/۶۸	۳/۹۰	۴/۲	۳/۸۹
PM10ug/M3	۳۸/۴۵	۲۰/۴۱	۴۳/۹۵	۵۶/۴	۵۴/۹



شکل ۹. شبهه‌سازی انتشار آلاینده‌ها در سطح شهر تهران

نتیجه‌گیری

با مشخص ساختن میدان‌های باد و دریافتن الگوی انتشار آن در سطح شهر و به کمک مدل TAPM می‌توان آلودگی را در شهر تهران به صورت روزانه پیش‌بینی کرد و نقاط بحرانی را به دست آورد تا تدابیر لازم و بموقع برای حفظ سلامت شهروندان اتخاذ شود. هرچند که بزرگ‌ترین ضعف در این حیطه، در اختیار نداشتن داده‌های آلودگی از تمام نقاط شهر است، اما با تفکیک کردن دامنه‌های خروجی از مدل به مناطق کوچک‌تر می‌توان تا حدودی این نقیصه را جبران کرد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی درخصوص آلودگی هوا در شهر تهران را در مجموع می‌توان چنین عنوان کرد:

۱. الگوی شبانه و روزانه باد در سطح شهر تهران متفاوت است. به طوری که در روز، جهت غربی و جنوب غربی و در شب جهت شمالی، شرقی و جنوب شرقی غلبه دارد.

۲. در شرایطی که سامانه سینوپتیک در شهر حاکم نباشد، الگوی باد نامنظم‌ترست و با افزایش ارتفاع، سرعت باد کاهش می‌یابد.

۳. در صورت حاکم شدن سامانه سینوپتیک، الگوی باد منظم‌تر می‌شود و با افزایش ارتفاع، سرعت باد افزایش می‌یابد.

۴. در دوره سرد سال، سامانه سینوپتیک باعث افزایش سرعت باد در نیمه غربی شهر می‌شود و به سمت شرق سرعت باد کاهش می‌یابد. سرعت باد به شدت در داخل شهر افت می‌کند و این عامل به تشکیل جزیره گرمایی کمک می‌کند.

۵. آلودگی هوا در شهر تابعی از الگوی باد است و از جهت و سرعت آن تبعیت می‌کند.

۶. شدت و میزان آلودگی از سمت شرق به غرب و از شمال به جنوب افزایش می‌یابد.

۷. بررسی داده‌های باد در سال ۲۰۰۶ نشان داد که در دو ایستگاه فاطمی و بازار هیچ‌گونه بادی بالاتر از سرعت آستانه اتفاق نیفتاد تا بتواند آلودگی را از بین ببرد. نبود باد با سرعت‌های بالاتر از آستانه به افزایش تراکم آلودگی در شهر دامن زده است.

منابع

- Air Quality Control Center, from 1997 to 2007, **Statistical Handbook of Tehran Air Pollution**.
- Aldrin M., 2005, **Generalized Addictive Modeling of Air Pollution Traffic Volume and Meteorology**, Oslo, Atmospheric Environment 37, 649–660.
- Alijani B., 2004, **The Relation between Pressure and Air Pollution**, environment organization.
- Arab-Hoseini & et al., 2004. **Numerical Simulation of Wind Shear in Complicated Topography**, Shiraz University.
- Ashok K. & et al., 2003, **Evaluation of TAPM, A Prognostic Meteorological and Air Pollution Model**, Using Urban and Rural, point-source data, Atmospheric Environment 30, 5543–5507.

- Ashok K. & et al., 2006, **Modelling PM10 Concentrations and Carrying Capacity Associated With Woodheater Emissions in Launceston**, Tasmania, Atmospheric Environment 40, 5543–5557.
- Bahram Soltani K., 1990, **Tehran Green Space**, Journal of Architecture, N. 8, pp 14-28.
- Brzozowski K., 2005, **Modeling of Air Pollution on a Military Airfield**, Air Force Academy, Dywizjonu 303 nr 12, 08-521 D, eblin, Poland
- Ebel A., 2001, **Modeling of Air Pollution on Regional Scales**, university of Cologne, Germany.
- Environment Organization, 1997, **Detailed Design for Tehran Air Pollution**.
- Environment Organization, from 1997 to 2007, **Statistical Handbook of Tehran Air Pollution**.
- Han Z., 2007, **A Regional Air Quality Model: Evaluation and Simulation of O3 and Relevant Gaseous Species in East Asia During Spring 2001**, Environmental Modelling & Software 22, 1328-1336.
- Harrison M. et al., 2005, **Measurement and Modeling of Air Pollution and Atmospheric Chemistry in the U.K. West Midlands Conurbation: Overview of the PUMA Consortium Project**, Department of Chemistry University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK.
- Hurley, P. et al., 2003, **Year-long, High-resolution, Urban Airshed Modeling: Verification of TAPM Predictions of Smog and Particles in Melbourne, Australia, Atmospheric Environment**, 37, 1899–1910.
- Hurley, P. et al., 2005, **TAPM: a Practical Approach to Prognostic Meteorological and Air Pollution Modeling**, Environmental Modelling & Software 20, 737-752.
- Hurley, P., 2002, **The Air Pollution Model (TAPM) Version 2. Part 1: Technical Description**, CSIRO Atmospheric Research Technical Paper No. 55, Available at <http://www.dar.csiro.au/TAPM>.
- Hurley, P., 2005, **The Air Pollution Model (TAPM) Version 3. User Manual**, CSIRO Atmospheric Research Internal paper No. 31. Available at <http://www.dar.csiro.au/TAPM>.
- Ionescu A., 2007, **Air Pollutant Emissions Prediction by Process Modeling e Application in the Iron and Steel Industry in the Case of a Re-heating Furnace**, Environmental Modelling & Software 22, 1362-1371.
- Landsberg, H. E., 1981, **The Urban Climate: Academic Press**, p. 288.
- Mansoor G., 1988, **Air Pollution**, University of Tehran, Tehran.
- Moharam Nejad, N. (2000), **Effect of Air Pollution on Human Health**, journal of environment, N. 23.
- Moradzade M., 1999, **Numerical Simulation of Tehran Heat Island**, university of Tehran.
- Ranjbar A. and Bidokhti, A. 2004, **Tehran Heat Island**, Journal of Physics of earth and space, v. 30, N.2, pp 1-19.
- Ranjbar, A. and Bidokhti, A. 2005, **The Effect of Tehran Heat Island on Climate**, journal of physics of earth and space, v. 32, n. 2, pp 11-22.
- Statistics Organization, 1996, **Iran Overall Census**.
- Tehran Municipality, 2005, **Counting Active Automobile**.

- Vicente L., 2007, **Modeling of Surface Explosion of NO + H₂ Reaction on Pt(100): Mean-Field Analysis and Dynamic Monte Carlo Simulations**, Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 272, 118–127.
- Zawar-Reza , Gaines Wilson, P., 2006, **Intraurban-scale Dispersion Modelling of Particulate Matter Concentrations: Applications for Exposure Estimates in Cohort Studies**, Atmospheric Environment 40, 1053–1063.
- Zawar-Reza et al., 2007, **Long Term Simulation of Mesoscale Floe and Air Pollution Dispersion over Tehran**, part1: low-level flow features, Conference on urban air quality, 27-29.
- Zawar-Reza, et al., 2005, **Evaluation of a Year-Long Dispersion Modelling of PM₁₀ Using the Mesoscale Model TAPM for Christchurch, New Zealand**, Science of the Total Environment, vol. 349, pp. 249-259.